

중성자 입사장치(NBI)용 휨 전자석(Bending Magnet)의 성능 시험

전 용우*, 오 병훈**, 장 두희**, 정 기석**

*, ** : 한국원자력연구소 핵융합연구LAB.

A test of the Bending Magnet on Neutral Beam Injection System

Yong-Woo Jun*, Byung-Hoon Oh**, Doo-Hee Chang**, Ki-Suk Jung**

Korea Atomic Energy Research Institute, Nuclear Fusion Lab.

Abstract - 본 연구에서는 차세대 초전도 핵융합장치(KSTAR)의 가열장치인 중성입자입사장치(NBI : Neutral Beam Injection) 시스템 중 휨 전자석(Bending magnet)의 중요한 파라메타인 전류에 따른 온도상승값과 B-field의 측정을 행하고 그 결과를 나타내었다. 휨 전자석(Bending magnet)은 중성입자입사장치(NBI) 시스템 중 중성화장치(Neutralizer) 후단에 설치되어, 미처 중성화되지 못한 이온들의 궤도를 변경시켜 중성입자와 분리되도록 한 후 이온덤프에서 이들 이온들의 에너지가 흡수될 수 있도록 하는 역할을 한다. 사용전원은 15[V, 1200[A]의 가변전원을 사용하였고 전류값 변화에 따른 온도상승값은 thermo couple 신호선을 이용하여 측정하였으며, B-field는 3차원 Gaussmeter를 이용하여 측정을 행하였다. 측정된 결과들은 설계시의 값과 비교분석을 행하여 오차를 줄여나가고자 하였고 향후 NBI 주 진공용기에 장착하여 중성입자입사장치의 개발 수행을 행하게 될 것이다.

$< 10^{-7} \text{ torr} \cdot \ell / \text{sec}$ 이 되도록 설계되었다. 코일부분은 전류의 흐름으로 인한 열의 충분한 흡수를 위하여 무산소동을 사용하여 구성하였고 진공공의 영향을 최소화하기 위해 SUS can안에 에폭시 몰딩을하여 밀봉하여 처리하였다.

표 1. NBI용 휨 전자석의 규격

전자석 간극 [mm]	간극 오차 [mm]	길이 [mm]	폭[mm]	최대자 장[kG]	최대온 도상승 허용분[ΔT]
180	± 0.01	1420	540	2.5	30°C

그림1에 NBI 휨 전자석의 개략도를 나타내었다.

1. 서 론

차세대 초전도 핵융합장치, KSTAR(Korean Superconducting Tokamak Advanced Research)플라즈마의 가열을 위한 중성입자입사장치(NBI : Neutral Beam Injection)의 개발을 위하여 여러가지 부품들을 설계제작하여 성능시험을 행하고 있다. 중성입자입사장치는 크게 이온원, OMA Scraper, Neutralizer, 휨 전자석(Bending magnet), 이온 덤프(Ion Dump), Calorimeter 등으로 구성된다. 그 중 휨 전자석(Bending Magnet)은 Neutralizer 후단에 설치되어, 미처 중성화되지 못한 이온들의 궤도를 변경시켜 중성입자와 분리되도록 한 후 이온덤프에서 이들 이온들의 에너지가 흡수될 수 있도록 하는 역할을 한다. 본 시스템에서는 120keV, 65A의 이온빔을 기준으로 중성화장치(Neutralizer)를 통과한 후 이온과 중성입자빔의 비율을 고려하여 이온의 궤적과 전자석 후단의 이온덤프에의 열 부하를 계산한 후 이를 기준으로 제작을 행하였다. 따라서 본 연구에서는 중성입자입사장치용 휨 전자석에 관하여 몇가지 중요한 성능 시험을 수행하고 그 결과를 나타내었다.

2. 본 론

2.1 NBI용 휨 전자석의 규격 및 사양

표1에 NBI용 전자석의 규격을 나타내었다. 제작된 전자석은 진공공에 설치되며 주진공용기의 진공도($< 10^{-7} \text{ torr}$)에 영향을 주지 않아야 한다. 전자석의 간극 표면은 니켈도금($> 25 \mu\text{m}$)하여 산화되거나 out-gassing으로 인해 진공도에 영향을 주는 일이 없도록 out-gassing rate가

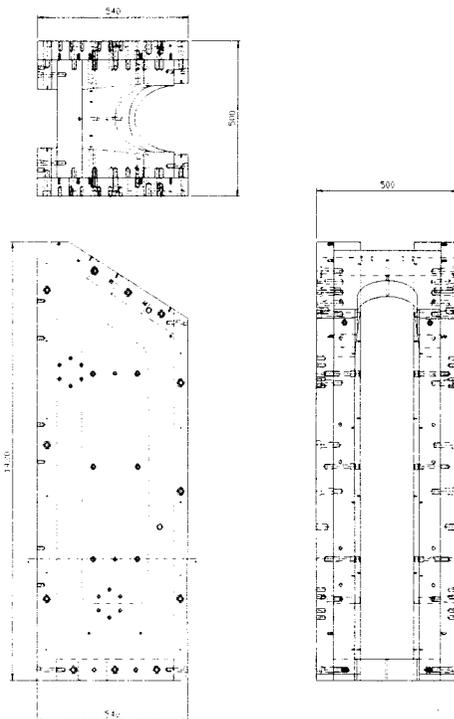
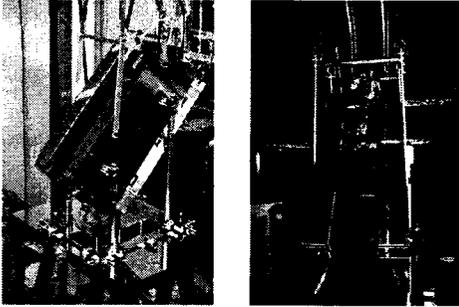


그림 1. NBI 휨 전자석의 개략도

사진1에 본 실험에서 사용한 휨 전자석의 사진을 나타내었다. 휨 전자석을 지지하기 위하여 전용 지지대를 제작하여 지지를 한 사진이다.



(a) 측면 (b) 정면

사진1. NBI용 휨 전자석의 측면과 정면 사진

2.2 측정조건 및 측정결과

휨 전자석의 성능을 시험하기 위한 전원장치로는 15[V], 1200[A]의 전원을 사용하였다. 코일의 규격은 5[mm]×6[mm]의 사각형의 관 형태로 구성되어 있으며 이 관을 통하여 냉각수가 공급되어 온도상승을 억제하게 된다.

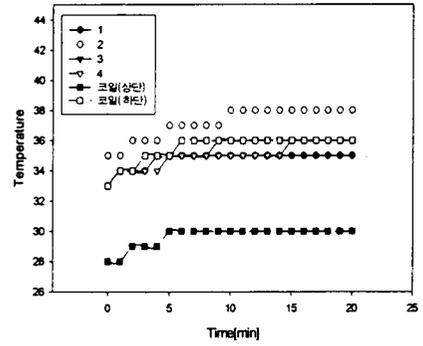
표 2에 본 실험에서 행한 측정조건을 나타내었다. 측정파라메타는 크게 온도와 자장값으로 구분된다. 온도는 Thermo couple을 이용하여 휨 전자석과 코일부의 온도상승이 크다고 생각되는 임의의 6곳을 선택하여 일정전류하에서 시간경과에 따른 온도상승을 측정하였으며, 자장값은 전류변화에 따른 자장값을 3차원 Gauss meter를 이용하여 측정을 행하고 그 값을 계산값과 비교를 하였다.

표2 측정조건

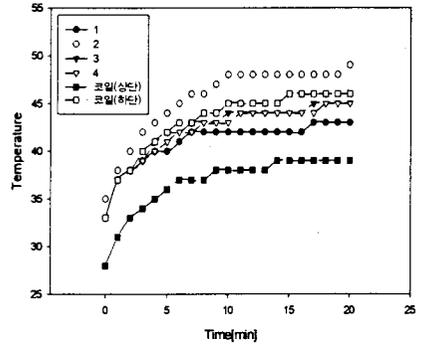
구 분	비 고
①. 냉각수압력	약 5기압
②. 냉각수량	약 280[lph] ~ 300[lph]
③. 인가전압	0 ~ 15[V]
④. 인가전류	100 ~ 910[A]

2.2.1 전류값변화에 따른 온도상승값 측정

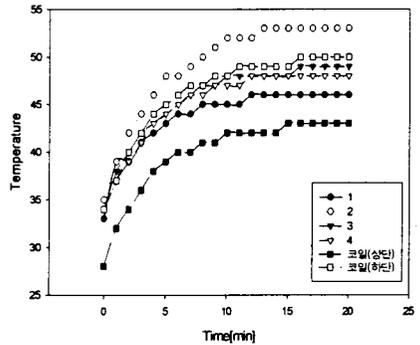
그림2에 전류값을 각 300[A], 600[A], 700[A], 800[A], 910[A]로 변화시켰을 때 시간에 따른 온도 상승 곡선을 나타낸 것으로 측정부위는 온도 상승효과가 크다고 생각되는 임의의 6지점을 선택하여 측정을 행하였다. 그림2의 (a),(b),(c),(d),(e)는 모두 전원 인가 후 20분 경과시까지를 측정 한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 온도상승분(ΔT)이 최대 상승 허용분인 30℃를 넘지 않는 것을 확인할 수 있었다.



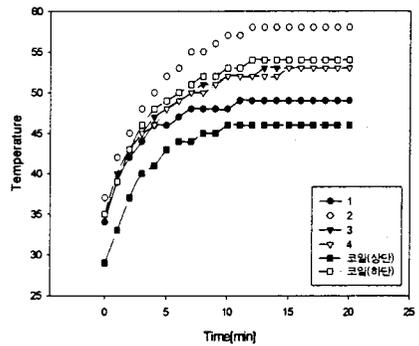
(a) 300[A]



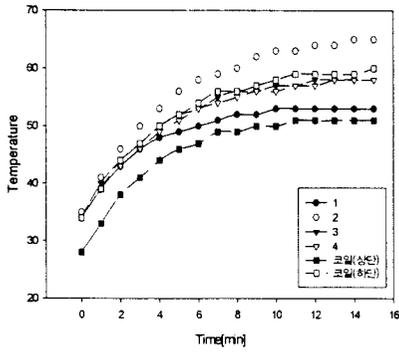
(b) 600[A]



(c) 700[A]



(d) 800[A]



(e) 910[A]

그림 2. 시간에 따른 온도 상승 곡선

2.2.1 전류값에 따른 B-field 측정

1). Saturation test

힘 전자석의 성능 시험중 위치에 따른 자장값의 포화유무를 확인하기 위해서 3차원 가우스메타를 이용하여 자장값 측정을 행하였다. 측정위치는 가우스메타의 푸로브 위치를 변경시키면서 가장 측정값이 높게 나오는 부분과 pole의 양측 끝부분을 대상으로하여 전류값을 변화시켜가면서 그때의 값을 기록하였다. 그림3에 측정의 개략도를 나타내었으며, 그림4는 위치에 따른 측정결과를 나타낸 것이다. 측정 위치는 자장값이 가장 큰 부분이라고 생각되는 중심부와 힘 전자석의 양쪽 끝부분을 선택하여 측정을 행하였다. 그림4에서 알 수 있듯이 전류값이 최대값으로 상승하더라도 자장값은 포화가 되지 않는 것을 알 수 있었으며 아울러 설계시에 요구된 최대자장값에 거의 만족하는 것을 알 수 있었다.

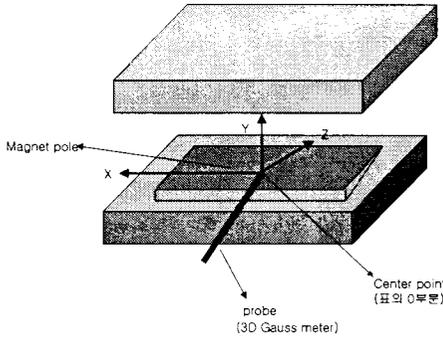
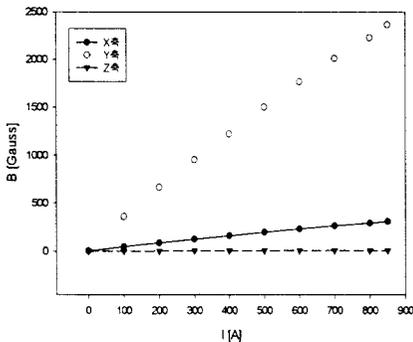
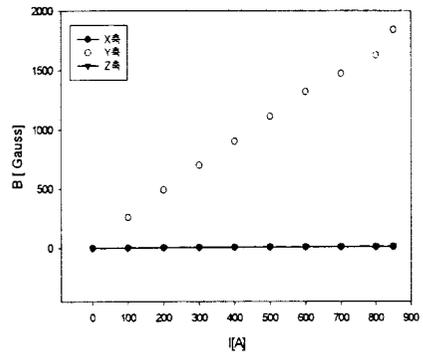


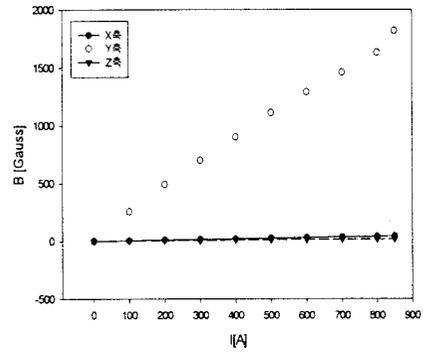
그림 3. 측정의 개략도



(a) 중심부[자장값이 가장 큰 지점]



(b) X=pole의 우측끝단, Y=9cm, Z=12cm



(c) X=pole의 좌측끝단, Y=9cm, Z=12cm

그림 4. 전류에 따른 자장값 포화 시험

2). 중심라인에 따른 자장값 측정

중심라인에 따른 자장값을 확인하기 위해서 가우스메타의 푸로브 위치를 이동시켜가면서 측정을 행하였으며 측정된 결과는 이론적인 계산값과 비교하여 그래프로 나타내었다. 그림5에 중심라인을 따라서 측정을 행한 측정의 개략도를 나타내었다. X와 Y값을 0의 위치로 고정시켜놓고 Z축값만을 변화시켜가면서 측정을 행하였다.

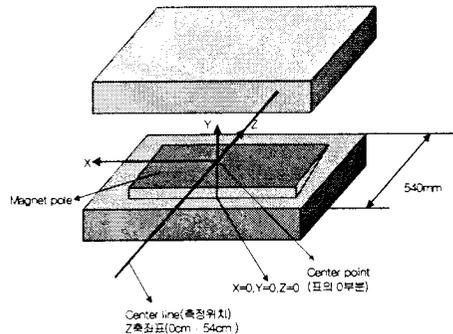
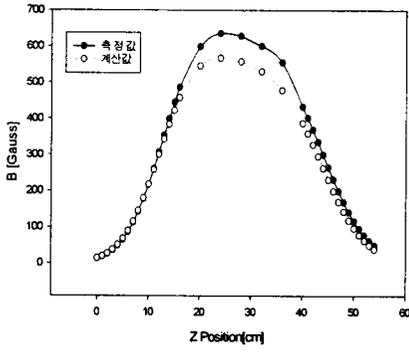


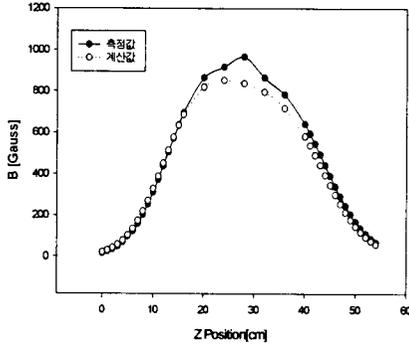
그림 5. Center line 측정의 개략도

그림6에 전류값에 따른 측정값과 계산값의 비교 그래프를 나타내었다. 측정 전류값은 200[A], 300[A], 400[A], 500[A], 600[A], 800[A]로 하였다. 그림에서 알 수 있듯이 측정값과 계산값 사이에는 약간의 오차는 발생하고 있으나

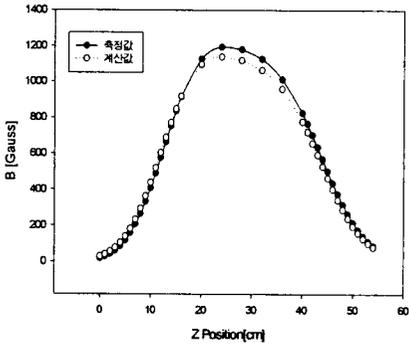
이는 실험적인 오차일 뿐 성능에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각되며 계산값과 거의 일치하는 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있었다.



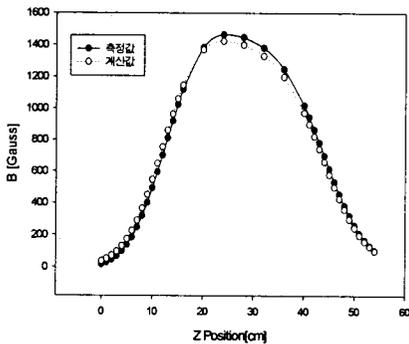
(a) 200[A]에서의 자장값 비교



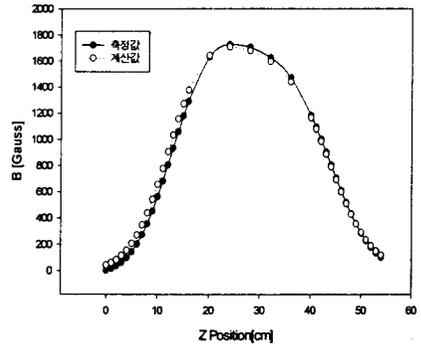
(b) 300[A]에서의 자장값 비교



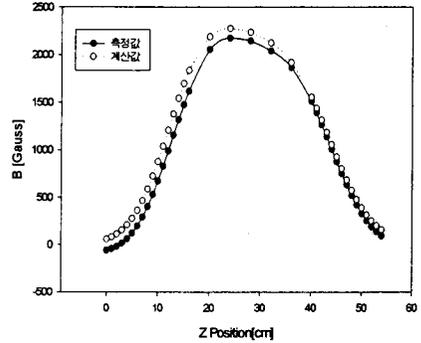
(c) 400[A]에서의 자장값 비교



(d) 500[A]에서의 자장값 비교



(e) 600[A]에서의 자장값 비교



(f) 800[A]에서의 자장값 비교

그림 6. center line에 따른 자장값 측정

3. 결 론

NBI system에서 사용될 휜 전자석의 시험제작 및 성능 시험을 행하였다. 제작된 휜 전자석은 전류에 따른 온도상승값과 자장값을 파라메타로 하여 세부적인 성능 시험을 행하였으며 이를 바탕으로 최초 설계시의 값들과 비교 분석할 수 있었다. 휜 전자석의 성능시험을 통해서 얻어진 결과를 간략히 소개하면 아래와 같다.

- ①. Thermo couple 신호선을 이용한 온도 상승분 측정에서는 300[A], 600[A], 700[A], 800[A], 910[A]로 전류값을 가변시키면서 시험을 행한 결과 최대온도 상승분이 30[°C]이하인 것을 확인 할 수 있었으며 이는 초기 설계시에 요구된 값을 만족하는 것을 알 수 있었다.
- ②. 전류값에 따른 자장값 측정을 통해서 전류값이 높을수록 자장값이 높은 것을 알 수 있었으며 설계시에 요구된 최대 자장값을 만족한다는 것을 확인 할 수 있었다.
- ③. 전류값에 따른 포화 시험에서는 임의의 3지점을 선택하여 측정을 행한 결과 포화가 되지 않는 것은 확인 할 수 있었다.
- ④. 중심라인에 따른 자장값 측정시험에서는 측정된 결과와 계산값을 비교하여 그래프로 나타낸 결과 큰 오차없이 일치하는 경향을 볼 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] : 홍봉근의 차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발사업중 "가열장치 개발·제작 2단계 최종보고서", pp. 141-145, 2002, 한국원자력 연구소
- [2] : TFTR Neutral Beam Injection System Conceptual Design, LBL, 1975
- [3] : TPX Systems design description NBI System, PPPL, 1993
- [4] : KSTAR Tokamak Systems Engineering Review Documents, KBSI, 1997내용[1] 저자명, "논문제목", 논문지명, 권호, 페이지, 출판년도